

ハッブルの法則に例外はあるか?

会 津 晃*

§1. はしがき

ハッブルの法則は、一口にいえば銀河の視線速度 v が、その銀河までの距離 R に比例することである: 比例定数を H として $v=HR$ 。もう少し詳しくいえば、つぎのような三つの内容を含んでいる。

(1) われわれに近い銀河では、距離が何らかの方法で分っているものが多い。これらについて上の関係が成り立つ。

(2) 銀河の距離が分からないときは、もしももとの明るさが同じであれば、見掛けの明るさは距離の二乗に逆比例するので、距離の目安になる。実際の銀河では、もともとの明るさが、いろいろあるので、それが同じものだけをおつめる。例えば、それぞれの銀河集団のなかで一番明るい銀河のもともとの明るさはほぼ同じである。これらについては、明るさの代わりに等級 m を使うと、観測から $m=5 \log v + \text{const.}$ が成り立つことが分る。これは内容的には $v=HR$ と同じである。

(3) 同じ銀河群または銀河集団に属する銀河の赤方偏移は、ほぼ同じである。もし見掛けのうで群や集団のメンバーでも、赤方偏移が他のものと大きく違っていれば、それは本当のメンバーでない。

このハッブルの法則を、観測でしらべるときは、視線速度の代わりに赤方偏移 z がよく用いられる。 z はスペクトル線の波長の相対的なずれ $z=(\lambda-\lambda_0)/\lambda_0$ として定義される。ここに λ, λ_0 はそれぞれ観測された、および本来の波長である。 v が光速 c より著しく小さいときは、ドップラーの関係 $z=v/c$ が成り立つが、 v が c に近いと相対論的な式を用いなければならぬ。

このハッブルの法則は 1929 年以来最近に至るまで、多数の銀河やその集団について成り立つことが確かめられてきた。最近のサンデイジの結果では、 m と Z の間に、 $z \leq 0.46$ の範囲で

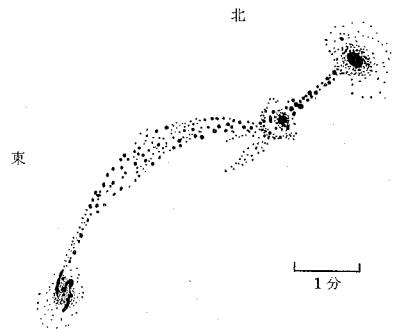
$$m = 5 \log z + 20.63$$

が成り立つ。これはハッブル定数 $H=55 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ に対応する。

一方理論的には、一般相対論に基づくフリードマンの膨張宇宙のモデルがハッブルの法則を説明できることは

よく知られている。

こうしてハッブルの法則は確立したと思われるが、疑義がすべてなくなったわけではない。上記の(3)に関して、写真で見るかぎり、お互いにつながっている銀河の集りで、一つの銀河だけ視線速度が他のものより大きく異なっているものがいくつかある。図1はツピッキーが



第1図 IC 3481 (右) 無名 (中央) IC 3483 (左) の三重システム。ツピッキーがたくさんのプレートからスケッチしたもの。

最初に見出した例で、IC 3481 と 3483 である。このうち 3483 の視線速度は 33 km/s で、他のものと比べ 7000 km/s も異なる。群や集団における視線速度のばらつきはふつう $300 \sim 1000 \text{ km/s}$ であるので、偶然重なったものとした方が自然のようであるが、最終的な結論にはもっと研究が必要である。

1963年に QSO (Quasi-Stellar Objects) が発見されたとき、その赤方偏移の値が極めて大きいこと、出されているエネルギーが極めて大きいこと、また比較的短時間の光の強度変化が観測されることなどから、これがハッブルの法則に従うかどうか問題になった。現在ではあとのべるような証拠から、多くの人に従うと考えているが、そうでないと考えている人もいる。ヘール天文台のアーブはその一人であって、QSO は他の活動的な銀河から放出されたものであるという説を以前から唱えていたが、一年ほど前に、QSO のそのように見える例や、上のツピッキーの例のようなもの、その他ハッブルの法則も一見疑わさせるような例を多数まとめて発表し、多くの人に不安の念をおこさせた。

筆者は以前から QSO などの赤方偏移はハッブルの法則に従うという立場で QSO の研究をしてきているの

* 立教大学理学部

Ko Aizu: On the Paradox of Red Shifts

で、アープの説を改めて検討した。とくに上のツピッキーの例のような場合「視線速度がとくに大きい(小さい)銀河は、見掛の明るさも暗い(明るい)、つまり遠いものが暗いということに反しなければ異常とは認めない」という規準(武谷三男先生の提案)を設けると、アープのあげている赤方偏移が異常な例は、ほとんどすべて異常でなく、ある銀河が偶然他の銀河群と重なったものとしてよいことが分った。勿論この問題の最終的な決着は、多方面からの詳しい観測の結果によるけれども、現在ではハッブルの法則を否定する積極的な観測的証拠はないと思われる。

以下異常があると思われる例を QSO (§2), 相互作用している銀河 (§3), 普通の銀河群 (§4) に分けて紹介する。アープの説は、QSO や銀河が他の銀河から放出されているとするので、この放出説の含む問題点をつぎのべる (§5)。さいごに赤方偏移の解釈に膨張宇宙によるもの以外にどんなものがあるかを紹介し、それらの含む問題点をのべよう (§6)。

§2. QSO

QSO はその赤方偏移がハッブルの法則に従う遠方の天体であるのか、またはわれに近い天体であるのか、について、以前からいろいろの点について議論されているが、ここではごく最近の話題にかぎろう。

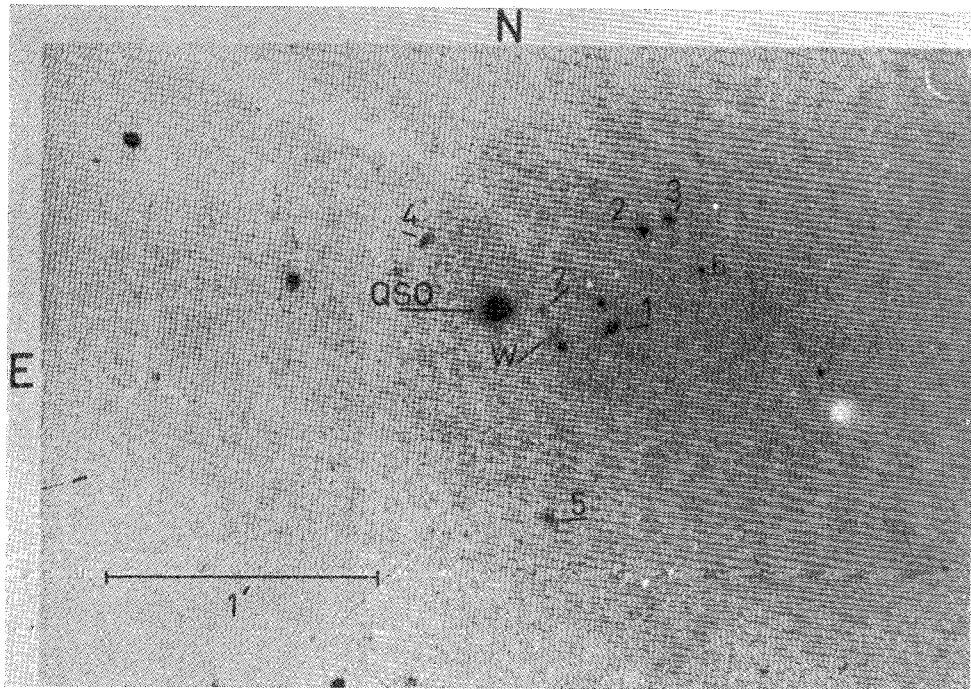
(1) 超光速

3C 279 という QSO を電波の超長基線干渉計を用い

て非常に分解能をあげてみると、二つの電波源が $0.001-55''$ 離れて見えた。4か月後に再び観測したら、両者はさらに $0.00014''$ 離れていた。これを両者の相対運動によるものとし、3C 279 の赤方偏移 $z=0.54$ から距離を 1600 Mpc とすると、この二つの電波源の離れてゆく速度は光速の7倍ということになってしまう。この困難をさける一つのみちは、3C 279 はその赤方偏移がハッブルの法則に従わず、もっと近い距離にあるとすることである。また別のみちは、干渉計による観測結果の解釈にはいくつかの仮定があることに注意することで、例えば、二つの電波源が動いたと考えるので、電波源が三つあり、中央のものが時間的に弱くなったとすればよい。またこのときの電波強度の変化を支持する観測もある。また 3C 120 という距離の分ったセイファート銀河においても、同じような見掛けの上の超光速と解釈できる現象が観測されているが、上にのべた第二の解釈を支持する電波強度の変動が観測されているので、3C 279 の超光速も見掛けのものと考えての方がより当たっていると思われる。

(2) 銀河集団中の QSO

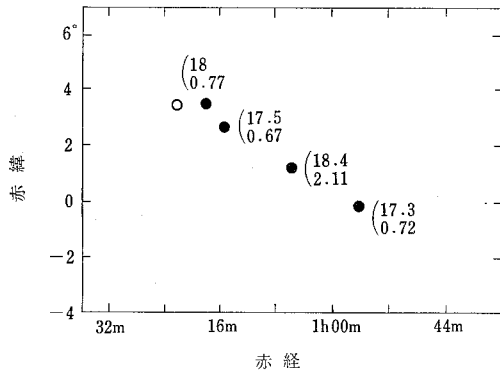
はしがきでのべたハッブルの法則の(3)を QSO に適用すれば、見かけの上で銀河集団に属する QSO があり、その赤方偏移が同じ集団の他の銀河のそれと同じかどうか問題になる。これは早くから指摘されていたが、われわれに近い 3C 273 などは孤立しており、それ以外の QSO は遠方であって、それに伴う銀河は暗くてスペ



第2図 QSO の PKS 2251+11 と近くの銀河群 (ガン Ap J. より)

クトル観測が難かしいため、そのような例はなかなか見つからなかった。最近そのような例が二つ見つかった。図2に PKS 2251+11 という名前の QSO とその群を示す。この QSO の赤方偏移は $z=0.327$ で、近くの銀河 No 1 のそれは $z=0.3240$ 、No 2 のそれは 0.3287 である。こうした例は観測が進むにつれて増えるであろう。

(3) QSO が明るい銀河から放出されているように見える例。アープはこのような例を昔から沢山集めていたが、何れも幾何学的に大きく離れていて説得力が弱かった。最近彼が見つけた例は、図3に見られるように、



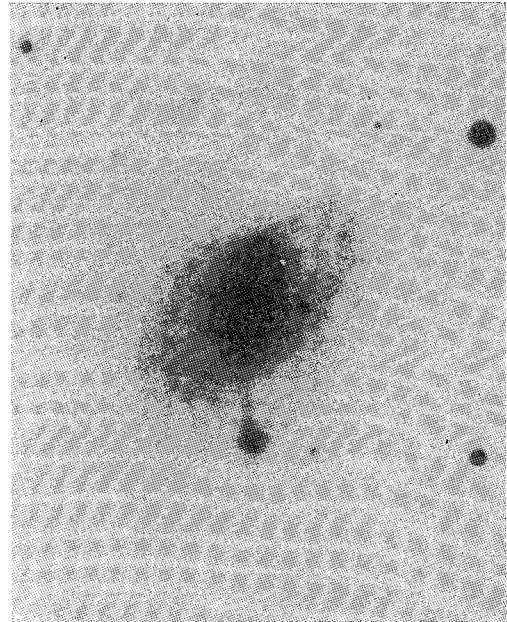
第3図 NGC 520 (○印) と近くの QSO (●印)。
数字は上が等級、下が赤方偏移。

NGC 520 から一方向に4個の QSO が約 7° にわたって並んでいる。これが偶然並んだのか、何らかの物理的な理由によるのかが問題であるが、赤方偏移は図に示してあるように、QSO の3個は似た値をもち、1個はその3倍の値をもっている。しかし図に記入してある等級によれば、遠方のものほど暗いので、遠方のものが偶然重なったと考えてよい。また電波のスペクトルの形から推定される QSO の電波的年令の順序も、アープの説に不利である。

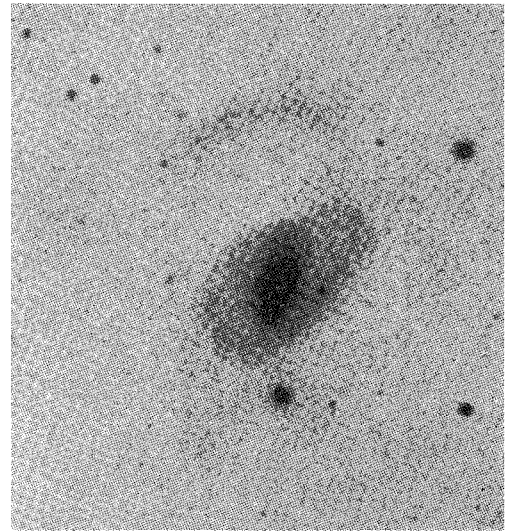
§3. 相互に作用し合う銀河

QSO や活動的な銀河では、その中心核で爆発が起こり、大規模なガスの放出がおこっていることは、今まで多くの人によって認められている。しかしアープは、図3の例のように、赤方偏移に目掛けの異常がある場合も、活動的な銀河からの QSO やコンパクトな銀河が放出されることで説明しようとした。理論上の困難はあとでのべることにして、彼のあげているほかの例をしらべてみよう。

(1) コンパクトな銀河が放出されている例。最近アープが発表して有名になった例を図4aに示す⁷⁾。中央に渦



(a)



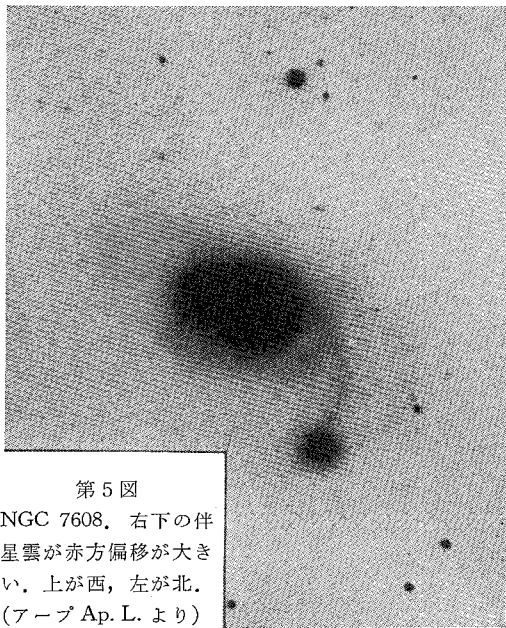
(b)

第4図 NGC 4319 (中央) とマルカリアン 205 (下の恒星状の銀河)。a ではつながりがみえるが b ではみえない。(アープ、およびフォード他, Ap. L. より)

巻型の銀河 NGC 4319 があり、その縁に中心から下に $40''$ 離れて、一見星のような銀河が見える。両者の赤方偏移はそれぞれ $z=0.0057$ と $z=0.070$ であるが、この中間に橋のようなものが見える。これが発表されると、すぐに多くの人々がいるいろの条件の下で、その写真などをもって調べた。なかには図3bのように橋のない写真を発表している人もいる。多くの人々の間で、小

さい銀河は赤方偏移がハッブルの法則に従うセイファート銀河であるとしても、矛盾のないことで意見が一致している。一方これらの銀河が同じ距離にある可能性は、現在の観測だけからは完全には排除できないにしても、大へん小さい。見かけの橋は二つの明るいものの裾が重なって見えるのか、あるいは第三の暗い天体が偶然そこにあるという可能性もある。いずれにせよ橋があるなら、その性質を明かにするのが先決問題である。

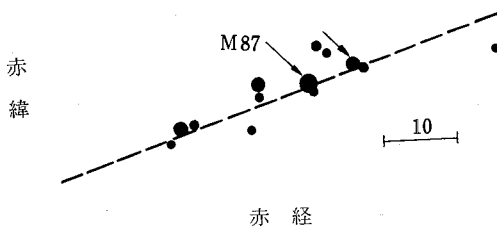
渦巻型の銀河では、のびた腕の先に小さい銀河のついた「親子銀河」が少なくない。身近な例は M51 であるが、この場合は親と子の視線速度の違いは 100 km/s の範囲内である。しかし図 5 に示す NGC 7603 の場合は



第 5 図
NGC 7603. 右下の伴星雲が赤方偏移が大きい。上が西、左が北。(アープ Ap. L. より)

親の $v=8,800$ km/s, 子の $v=16,900$ km/s でその違いは大きい。子の v は星からの吸収線で観測されたものであり、子は単にガスの固まりでなく、銀河である。子の方が小さく暗いので、偶然重なった例と見ることがができる。

(2) 銀河の鎖。§2 で QSO が一直線に並んだ鎖を作



第 6 図 M87 を含む銀河の鎖。

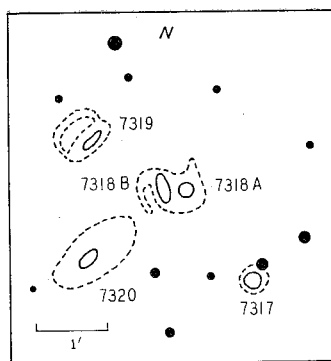


第 7 図 VV 172 (サージェント Ap. J. より)。

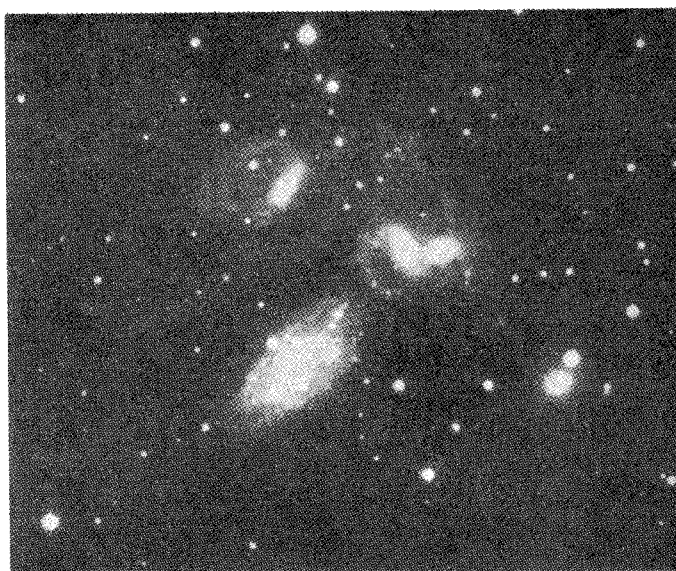
っている例を紹介したが、銀河が同じような鎖を作っている例をあげよう。図 6 は乙女座集団のなかで、M87 を中心にその近くの E 型銀河の分布を示したもので、ほぼ一直線上に並ぶ。点線は M87 の中心近くにある有名なジェットを延長したもので、E 型銀河の方向と不思議に合っている。ジェットは中心核からガスが噴出したものと一般に推論されているが、直線上の銀河が全部中心核から放出されたとは考えにくい。この例は宿題としておこう。

別の例は、図 7 に示す VV 172 という銀河の群である (VV は Vorontsov-Velyaminov の作った相互に作用し合っている銀河のカタログの略称)。上から順に A, B, C, D, E とすると、赤方偏移は B だけ大きく $z=0.123$ であるが、のこりは A の $z=0.0536$ から順に小さくなって E の $z=0.0516$ になっている。A, C, D, E は回転する安定な系を作っていると考えられる。アープは B が多少変わった銀河であるので、この系に属するとしているが、他のものより暗いので、偶然重なったものとして差支えない。

(3) 銀河群。はしがきにのべたように銀河群のメンバーの銀河はほぼ同一の赤方偏移をもつのが普通であるが、IC 3481+83 のような例外がいくつかある。そのうちよく調べられている例の一つは、図 8 に示したのはステファンンの五つ子である。視線速度は左下の大きい銀河



第8図 ステファンの五ツ子。
(スカイアンドテレス
コープより)



NGC 7320 が約 1000 km/s, のこりは全部約 7000 km/s である。アープは全部が一つの群であるとしているが、はしがきの「規準」では、NGC 7320 が偶然ここに重なったとして差支えない。最近アレンは NGC 7320 の水素の 21 cm の線の観測に成功し、その視線速度は光のと同じく約 1000 km/s であることを見つけた。水素ガスは銀河全体に拡がっているのだから、その赤方偏移が異常であることは考えにくい。しかしアープは更にこの五つ子と、それから 0.5° 離れた NGC 7331 との間に物理的なつながりがあるとして証拠を探しているが、結論は出ていない。

§4. ふつうの銀河群と銀河集団

前の § では、銀河同志がお互いに近くにあつて、形の上でも相互に作用し合っている場合も問題にしたが、相互間の距離がもっと離れているふつうの銀河群や銀河集団でも、問題になることがある。

(1) 銀河群. アンドロメダ銀河 M31 は2個の小さい銀河 M32 と NGC 205 を伴っていることはよく知られている。ホルンベルクが最近渦巻型銀河でこのようなつれの銀河をもっているもの 174 個を調べたところ、中心銀河の周りのつれの銀河の分布に異方性があることを見出した。中心銀河の円板から 30° 以内には、つれの銀河が殆んどないのである。これはつれの銀河は中心銀河の中心核の爆発で、ガスが異方的に放出され、そのガスからつれの銀河が形成されたのか、あるいは、これらの銀河は殆んど同時に形成され、形成時にすでにこのような配置をもっていたのか、いずれかと思われるが、まだ決着がついていない。

(2) 銀河群の赤方偏移. いまのべたような銀河群では、中心の銀河に対してつれの銀河の相対的な視線速度は、平均として 0 になることが期待される。ところがアープは3個の銀河群 (M31 とその周りの4個 (さきあげた2個に NGC 185 と M33 を加える), M81 と周りの5個, NGC 5128 と周りの4個) および M51 のような二重銀河6個について、周りの銀河の視線速度は中心銀河のそれに比べて、平均約 100 km/s 大きいことを主張した。これに対してルイスはもっとたくさんの銀河をしらべて、統計をふやすと、このようなことはないとしている。

(3) 赤方偏移と銀河の型. 乙女座集団内の銀河で、楕円型 (SO 型も含む) の視線速度の平均は ~ 1000 km/s で、渦巻型のそれは ~ 1600 km/s でくいちがっていることは、1961年にド・ボークルールによって指摘され、この集団は2つの集団の重ね合わせであることが示唆された。最近ヤークラは、同様の傾向が多数の集団や群について見られることを示した。楕円型の視線速度の方が平均として、少し小さい。しかしその違いは、ばらつきの十分の一程度なので、本当は何とも云えないのであろうが、ヤークラは違いがあると主張している。しかし最近タンマンが乙女座集団について、視線速度測定の際の系統誤差を一層注意して補正し、観測された銀河の数を倍にすると、単一の視線速度 1140 km/s で済むことが分った。したがってヤークラのいう差も、実際にはないと思われる。

§5. 銀河の放出

QSO や銀河の中心核で大きな爆発がおこり、ガス(高

温のプラズマ)の雲を噴出することは、そのメカニズムが十分解明されていないにしても、観測的にはほぼ確立したと考えてよい。しかし §2~4 の種々の例を、銀河や QSO そのものが、他の銀河の中心核から放出されたと考えることは、理論的にいろいろ問題がある。それを説明しよう。

(1) 銀河の主要な構成員は星である。一般に星の集りは、力学的には重力に支配されているために、形をかえるには時間がかかる。そして放出されたと主張される銀河はたしかに星を含んでいる。赤方偏移が測定されるスペクトル線は、一般には、吸収線なら星から、輝線ならガスから出されると考えられている。赤方偏移の異常があるといわれる銀河のスペクトルには、多くの場合太陽に見られると同じような吸収線があるので、その銀河は普通の星を含んでいる。したがって、ある銀河の中心核に、小さく固まった他の銀河が始めからあって、それが爆発で放出されて、短時間に(例えば 10^8 y) 大きくなるとは考えられない。

(2) 爆発で中心核にあったガスの固まりがふきとばされてから膨張し、それから星ができたとして、もし星が太陽のような、年令 10^8 y 以上のものであれば、その銀河は、ふきとばされたあと、現在の位置に長く留められていたことになるが、これは考えにくい。また星が、 $10^6 \sim 10^7$ 年の年令の若い星であれば、現在もふきとばされている最中である。何れにせよ星の性質を観測できめることが大切である。

(3) 鎖状の銀河群については、銀河形成のときから鎖状に並んでいた、という考えがある。VV 172 の場合のように、全体として安定な回転している例もあるが、一般には銀河間の相対運動が不規則である。その大きさが 300 km/s 位あれば、たとえ始めは鎖状に並んでいたにしても、 $10^7 \sim 10^8$ y 位で形がくずれてしまう。したがって相対運動がその近くだけ特別に静かであるのか、または銀河が作られてからあまり年数がたっておらず、銀河に含まれている星も若いことになる。この場合も星の性質を明かにすることが大切になる。

§6. 赤方偏移の異常の説明

ハッブルの法則が発見されたとき、膨張宇宙による説明が唯一のものとしてすぐに受け入れられたわけではなく、他の説もあった。それらも含めて、赤方偏移の説明に膨張宇宙説以外にどんな説があるかを紹介し、それらのもつ難点を説明しよう。

(1) 「疲れた」光の説

宇宙全体は膨張せず静的で、ただ光が遠方の銀河からわれわれのところにくるまでに、何らかの原因でエネルギーを失なうとするものである。これを散乱によるもの

とすれば、散乱体が必要であるが、銀河間には、十分な密度の散乱体はない。さらにこの説では、赤方偏移の大きさと、銀河の見かけの明るさや、大きさの間の関係の観測結果 ($0 < Z < 0.5$ の範囲で) を説明できない。

(2) 重力偏移・大きさは小さいが、質量は非常に大きいという天体があれば、光がその近くで放出されるときは重力による赤方偏移をうける。しかしそのためには光の放出される場所は、その天体のごく近くに限られる。3C 273 のような準星や、VV 172 の B では、光がかなり広がった領域から出ているという証拠がある。またステファンの五つ子のうち、異常があるとされる NGC 7320 は、21 cm の電波が観測され、光と同じ赤方偏移を示す。21 cm は銀河体全に広がった稀薄な中性の水素原子のガスから放出されるので、その赤方偏移が、重力偏移によるものとは考えがたい。また現在 140 個の銀河について、光と電波の 21 cm による赤方偏移の一致が確かめられていることも、重力偏移説には不利であろう。

(3) 銀河によって物理学が異なる可能性。われわれの銀河系で確かめられた物理学——とくに原子物理学——が他の銀河系や宇宙全体において、そのまま成立つとふつうされているが、これは始めから自明なことではなく、験めされなければならぬことである。赤方偏移はそのための手段を提供しているといってもよいであろう。

例えば一番簡単な異なり方として、遠方の銀河系でもわれわれの銀河系と同じような物質(電子や原子核)などから成り、また同じような力学、電磁気学、量子力学が成立つが、物理定数が異なっているという可能性を考えて見よう。一つの例として光速 c 、プランク定数 h 、動力定数 G などは同じとしよう。単位電荷を e 、電子の質量を m 、陽子の質量を M とし、微細構造定数を $\alpha = 2\pi e^2/\hbar c$ とし、これらが異なる可能性を考えてみよう。ふつうの光のスペクトル線は $\alpha^2 m c^2$ に比例し、水素の 21 cm の線は $\alpha^4 (m/M) m c^2$ に比例するので、もし両者が同じような異常を示すとすれば、 $\alpha^2 m/M$ は同じである。簡単のため α 、したがって e は同じであるとすれば、 m と M の変化は比例する。異常を示す赤方偏移 z' は異常な電子質量 m' を用いて $1+z' = (1+z)(m'/m)$ とかける。ステファンの五つ子の場合は $m'/m = 1.02$ である。陽子の質量についても $M'/M = 1.02$ となる。原子の出すスペクトル線の強さは $m c^2/\hbar$ に比例して変り、その他のいろいろの散乱断面積も変るので、銀河は異なって見えるであろうが、 $m'/m = 1.02$ 位ならば、そのちがいはそれ程大きくないと思われる。

しかし銀河系毎に電子質量が異なるという考えは、膨張宇宙論では許されない。膨張宇宙はごく初期には一つの火の玉であって、十分よくまぜられており、異なる質

量の電子があったとしても、質量の分別がおこることは理解し難い。

以上のように、もし赤方偏移の解釈には、膨張宇宙にもとづく以外にうまい理論はなかなか作れない。一方観測では、ハッブルの法則の例外と考えられる確実な例はまだないので、アープのこのような赤方偏移の異常はな

いと考える方が、当面はより自然であると思われる。

さいごに一言、ここに示した写真は残念ながら全部外国でとられたものである。このような写真が、日本でも早くとられるようになることを期待したい。

武谷三男先生、寿岳潤先生に討論していただいたことを感謝します。

掲 示 板

第3回天文天体物理若手夏の学校

日 時 1973年7月30日(月)～8月3日(金)

場 所 北志賀竜王(長野県下高井郡山ノ内町)

分科会 (I) Galaxies

(II) Interstellar, Star Formation
(Dust, Molecule, Intercloud)

(III) 星(X-star, Binary, Spectrum, 回転流体)

(IV) 一般相対論(Black Hole 物理学)

共同企画 Over Doctor 問題

連絡先 京都大学物理, 天体核宇宙線若手

日本アマチュア天文研究発表第6回大会発表申込みのご案内

日 時 昭和48年10月28日(日)

場 所 川崎市立産業文化会館

発表内容 天文学に関する日頃の研究・観測結果など

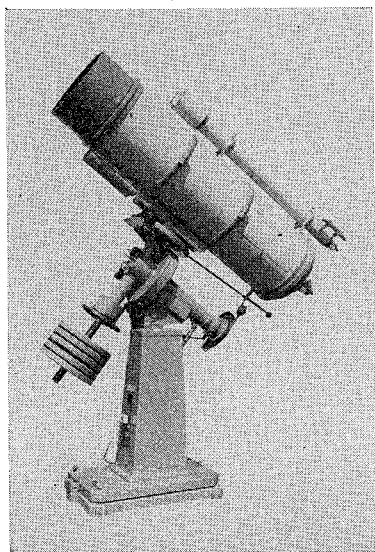
発表時間 1人10分以内(時間厳守)

申込み締切 8月25日までに必着

連絡先 川崎市多摩区登戸新町208

川崎市天文同好会事務局内

日本アマチュア天文研究発表第6回大会事務局あて



天体望遠鏡
ドーム, 製作

西村製の天体望遠鏡

40 cm 反射望遠鏡の納入先

- No. 1 富山市立天文台
- No. 2 仙台市立天文台
- No. 3 東 京 大 学
- No. 4 ハーバート大学 (USA)
- No. 5 ハーバート大学 (USA)
- No. 6 台 北 天 文 台 (TAIWAN)
- No. 7 北イリノイズ大学 (USA)
- No. 8 サン・チェゴ大学 (USA)
- No. 9 聖アンドリウス大学 (ENGLAND)
- No. 10 新潟大学高田分校
- No. 11 ソウル大学 (KOREA)
- No. 12 愛知教育大学(刈谷)

606 京都市左京区吉田二本松町 27

株式会社 西村製作所

TEL. (075) 771-1570
691-9580